

文章编号: 1001-1455(2010)05-00551-05

基于小波包的爆炸容器振动分析^{*}

管永红, 胡八一, 黄 超

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 首先介绍了小波分析与小波包分析的原理和特点, 然后给出了实际的爆炸容器振动的实验测试结果, 最后应用小波包分析计算了其振动分量的时频分布情况, 并对时频分析结果进行了讨论。分析结果表明, 爆炸容器的振动信号能量分布处于较宽的频带范围, 振动能量随时间变化的发展出现剧烈的变化, 隔震沟衰减了信号主要频带范围内 97% 的能量。

关键词: 爆炸力学; 时频分析; 小波包变换; 爆炸容器

中图分类号: O383.3

国标学科代码: 130 · 3520

文献标志码: A

1 引 言

25 kg TNT 当量爆炸容器目前是我国最大当量的室内爆炸容器, 由于在役运行可能产生较强的地面振动冲击, 因此, 对它产生的振动特征的认识十分重要。这种振动信号具有复杂、不规则、突变和衰减快等特点, 属于典型的非平稳随机信号。对这种信号进行频谱分析是爆炸研究中的重要研究内容。爆炸振动可以利用多种测试仪器进行实时测量, 这些测量结果提供了最原始的振动分布资料。FFT 变换可以对振动分布信号进行频谱分析, 获得更为直观的振动信号频谱分布。然而传统 FFT 分析主要适用于平稳信号的频谱分析, 对于振动信号这类非平稳信号, FFT 分析不是最佳选择。小波分析是另外 1 种时频分析方法, 在时域和频域均具有良好的局部化性质, 可以较好地解决时间分辨与频率分辨之间的矛盾。对于爆炸振动这类非平稳信号, 小波分析是 1 个十分有效的工具。鉴于此, 小波变换在爆炸振动信号的分析中得到了广泛的应用。林大超等^[1]利用小波变换的方法对爆炸地震效应振动信号的时变频谱特征进行了研究, 凌同华等^[2]将小波变换应用于分析不同频带上振动能量分布情况与爆炸发生条件之间的关系, 黄文化等^[3]将小波变换应用于爆炸振动的安全性分析。本文中, 将小波分析应用于 25 kg TNT 当量爆炸容器的振动信号分析, 利用小波包分析方法获得爆炸容器振动信号在不同位置的时频特征以及能量分布, 为系统的减震设计提供参考依据。

2 小波包分析原理

若 $\phi(t) \in L^2(R)$, 满足如下允许性条件

$$C_\phi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Phi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < +\infty \quad (1)$$

则称 $\phi(t)$ 为基本小波或母小波, $\Phi(\omega)$ 为 $\phi(t)$ 的傅立叶变换。由基小波生成的小波函数系可表示为

$$\phi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

将信号在这个函数系上进行分解, 就得到连续小波变换的定义。

设 $f(t) \in L^2(R)$, 则对它可允许小波函数 $\phi_{a,b}(t)$ 的连续小波变换为

$$(W_\phi f)(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\phi_{a,b}(t)} dt \quad (3)$$

^{*} 收稿日期: 2009-06-30; 修回日期: 2010-02-22

作者简介: 管永红(1972—), 男, 博士, 副研究员。

式中： $\bar{\psi}_{a,b}(t)$ 为 $\psi_{a,b}(t)$ 的共轭。式(3)中求得的是任意信号在固定小波函数 $\psi_{a,b}(t)$ 上的分量,对参数 a 、 b 展开后,可得到任意时刻、任意精度的频谱。对于实际的计算而言,这样的代价太高,为此将参数 a 、 b 进行离散化,同时令选取的离散点满足 $a_0=2, b_0=1$,即得到 2 进制离散小波

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2}\psi(2^{-j}t - k) \qquad j,k \in \mathbf{Z} \tag{4}$$

对于给定的函数 $f(t)$,离散小波变换系数及其重构公式为

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\bar{\psi}_{j,k}(t)dt \tag{5}$$

$$f(t) = \alpha \sum_{-\infty}^{\infty} \sum_{-\infty}^{\infty} C_{j,k}\psi_{j,k}(t) \tag{6}$$

式中： α 为与信号无关的常数。

采用 2 进制小波时,小波分析将信号分解成为低频与高频 2 部分,其中低频成分又可在下 1 层分解中分为高频与低频成分,如此重复直至满足要求。函数 $f(t)$ 与分解的各层成分满足如下关系

$$f(t) = h_N(t) + g_N(t) + \cdots + g_1(t) \tag{7}$$

式中： $h_N(t)$ 为第 N 层分解的低频成分, $g_i(t)$ 为第 i 层分解的高频成分。

小波分析中对各层分解出的高频成分没有进一步处理,因此对信号的分析具有局限性。为了克服该局限性,将分解出的高频成分进行与低频成分相同的分解处理以得到更精细的分析结果,这种方法称为小波包分析方法。利用小波包将上 1 层的信号分解为高频与低频 2 个成分,构成 1 个二叉子树。

对于每个能量有限的信号,小波包基可以利用各频率子带上的信息提供 1 种特定的信号编码和信号重构方法。对给定能量的信号 $f(t)$,设频率分布为 $0\sim\omega_{\max}$,则对它进行 i 层小波包变换后得到 2^i 个子频率带,每个子频带的频率宽度为 $\omega/2^i$ 。利用小波包分解系数可以实现对子频带范围信号的重构

$$f_{i,j}(t) = \alpha \sum_{-\infty}^{\infty} C_{j,k}\psi_{j,k}(t) \tag{8}$$

总信号可以表示为

$$f(t) = \sum_j f_{i,j}(t) \tag{9}$$

式中： $f_{i,j}(t)$ 为第 i 层分解节点 (i,j) 的重构信号。如果采用 2 次能量型时频表示对应每个频带上的重构信号,可以定义时频谱

$$W(t,\omega_j) = |f_{i,j}(t)|^2 \tag{10}$$

式中： ω_j 表示第 j 个频带的中心频率,对应的能量

$$E_{i,j} = \int W(t,\omega_j)dt = \int |f_{i,j}(t)|^2 dt \tag{11}$$

当频带划分足够细时,频带可以被近似认为是连续的频率分布,式(10)描述了在整个时域和频域上信号 $f(t)$ 的连续分布时频谱,式(11)描述了给定频率上的能量密度。在原始信号频率范围内的集合 E_k 正好是信号功率谱密度分布规律^[4]。

3 爆炸容器产生的地面振动实验监测结果

爆炸容器及其周边结构如图 1 所示,实验中炸药用棉布带悬于容器中心。根据经验,在这种情况下水平方向的振动加速幅值很小可以不予考虑,主要考虑垂直方向的振动加速幅值^[5]。

实验中利用加速度计测得的 B、C 等 2 点的波形如图 2 所示。信号的采样周期为 10^{-5} s,采样的点数为 51 200 点,总的采样时间为 0.512 s。根据采样定理可知,信号的采样频率为 100 kHz,在该采

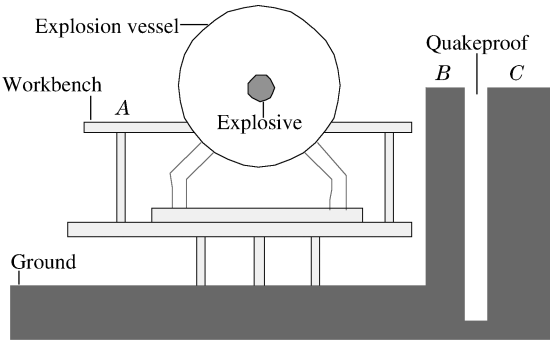


图 1 爆炸容器及其振动信号测试点布局
Fig.1 Schematic diagram of an explosion vessel and measured point layout

样率下信号的频率范围为 0~50 kHz。

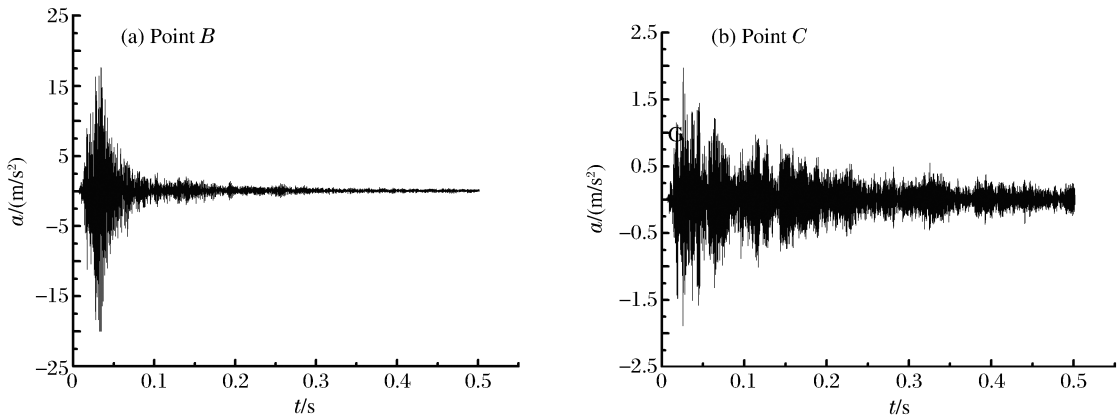


图 2 不同位置的振动加速波形

Fig. 2 Vibration acceleration signals measured at different positions

4 振动信号的小波包分析

小波变换中有多种小波基函数可以选择,同时不同的基函数对分析结果有一定的影响。有很多学者专门就振动问题构造了小波基函数^[6],目前在非平稳振动信号分析中用的较多的是 DB8 小波基函数,该函数适合于短时非平稳随机信号的分析,对地震、结构的风载效应、海浪效应等取得了较好的效果^[7]。基于此,本文中也选择该函数作为爆炸容器振动信号分析的小波基函数。原始信号利用 DB8 小波包经过 10 级分解后,利用式(6)进行信号重构,图 3 为重构信号与实际信号的相对误差分布。从图中可以看到重构信号与原始信号高度一致,说明 DB8 小波非常适合于处理非平稳信号。

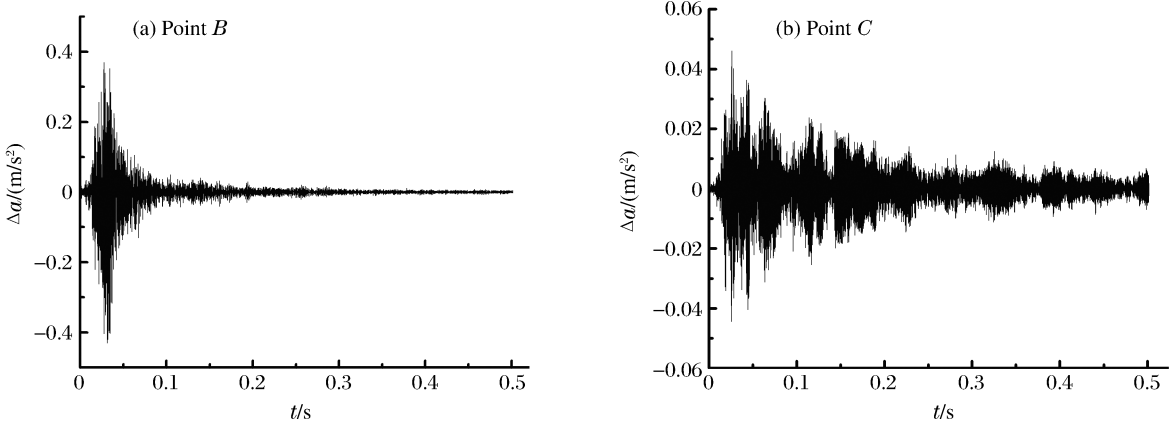


图 3 重构信号误差分布

Fig. 3 Vibration acceleration errors of the reconstruction signals at different positions

考虑到原始信号采样间隔为 10^{-5} s 以及 Nyquist 采样准则,原始信号中最高分析频率为 50 kHz。利用 DB8 小波对原始信号进行 10 层小波包分解,得到 1 024 个子频带,每个子频带对应的频率间隔为 48.8 Hz。对每个频带利用式(11)计算频带能量,得到信号在不同频带内的能量分布,见图 4。从图中可看出,经过爆炸容器隔震措施处理后的振动信号能量主要集中在数个频带范围,在 B 点处频率为约 1.5 kHz 信号的能量分布最大,在 C 点则频率为约 2.5 kHz 信号的能量出现峰值。对图 4 所示功率谱进行统计发现,C 点总能量为 B 点总能量的 2.3%,说明经过隔震沟衰减后,约 2.3%的能量被传递至隔震沟外。对比不同位置信号的频谱分布可以看出,隔震沟对振动信号中的低频成分(2 kHz 以下)具有很好的衰减效果,而对 2 kHz 以上的信号衰减效果不明显,这可能与隔震沟的参数(深度、宽度)有关,这一结果与文献[8]的结果一致,即隔震沟对低频面波的衰减作用较显著,对高频波的衰减作用较弱。

小波分析的最大特点是可以给出信号的不同频率成分随时间的变化规律。图 5 是利用小波包分析

获得的信号在不同频带上的加速度峰值分布,从图中可以看到不同频带的振动峰值。图 6 是图 4 中对应信号频率峰值附近频带上的重构信号,可以分析不同频带信号随时间的变化规律。利用小波包分析得到的这些信息对爆炸容器的防震设计具有重要的参考价值。

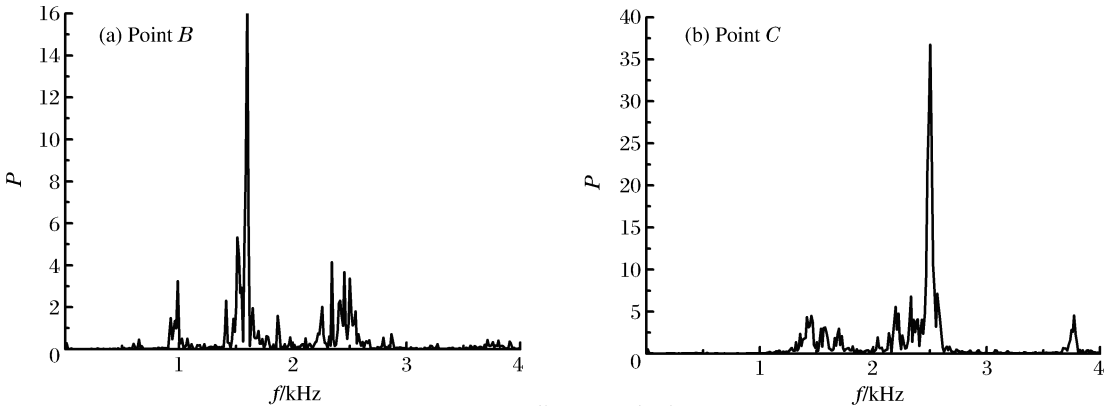


图 4 振动信号的功率谱

Fig. 4 Power spectra of the vibration signals at different positions

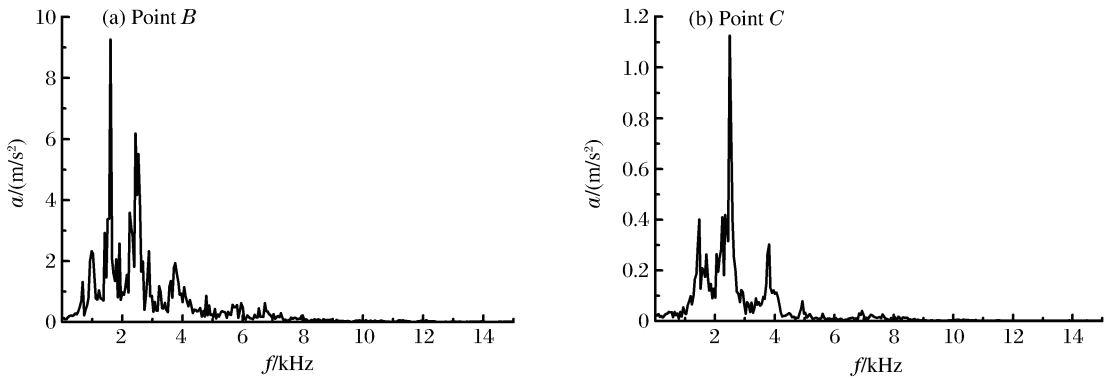


图 5 不同频带的峰值加速度分布

Fig. 5 Maximum acceleration distribution varying with frequency

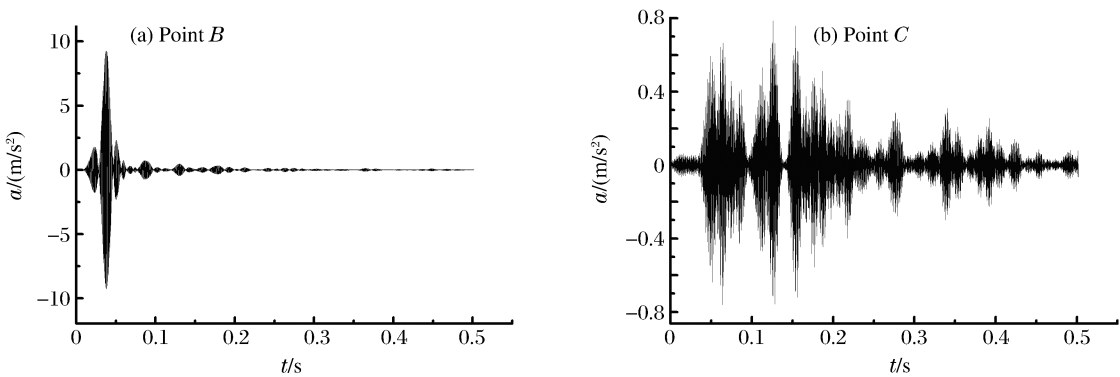


图 6 峰值频率处的重构信号

Fig. 6 Vibration acceleration signals reconstructed by the coefficient of maximum power spectral frequency bands

5 结 论

小波包分析可以对已分解的高频成分作进一步分解,从而提高时间分辨率,具有更好的时频特性,可以满足短时非平稳爆炸振动信号时频分析的需要。

采用 DB8 小波为基函数的小波包分析方法,分析了 25 kg TNT 当量爆炸容器振动信号。结果表明,采用的隔震沟使低频部分信号有大幅度的衰减,传递至隔震沟外的信号能量仅占 2.3%,同时给出

了不同频带上的振动峰值以及对应信号频带峰值位置上的重构信号,可为系统的防震设计提供参数。

参考文献:

- [1] 林大超,白春华.连续小波变换离散化的爆炸振动特征分析[J].爆炸与冲击,2005,25(5):430-436.
LIN Da-chao, BAI Chun-hua. Analysis of blast vibration characteristics by using discretization of continuous wavelet transform[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(5):430-436.
- [2] 凌同华,李夕兵.地下工程爆破振动信号能量分布特征的小波包分析[J].爆炸与冲击,2004,24(1):63-68.
LING Tong-hua, LI Xi-bing. The features of energy distribution for blast vibration signals in underground engineering by wavelet packet analysis[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(1):63-68.
- [3] 黄文华,徐全军,沈蔚.小波变换在判断爆破地震危害中的应用[J].工程爆破,2001,7(1):24-27.
HUANG Wen-hua, XU Quan-jun, SHEN Wei. Application of wavelet transform in evaluation of blasting vibration damage[J]. Engineering Blasting, 2001,7(1):24-27.
- [4] 林大超,施惠基,白春华,等.爆破震动时频分布的小波包分析[J].工程爆破,2002,8(2):1-5.
LIN Da-chao, SHI Hui-ji, BAI Chun-hua, et al. On time-frequency distribution of blasting vibration through wavelet packet transform[J]. Engineering Blasting, 2002,8(2):1-5.
- [5] 胡八一,刘仓理,陈石勇,等.25 kg TNT 当量爆炸容器的冲击隔震研究[J].振动与冲击,2006,25(6):43-45.
HU Ba-yi, LIU Cang-li, CHEN Shi-yong, et al. Study on isolation of shock induced vibration of a 25 kg TNT equivalent explosion vessel[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006,25(6):43-45.
- [6] Newland D E. Wavelet analysis of vibration, Part 1—Theory[J]. Journal of Vibration and Acoustic, 1994,116(4):409-416.
- [7] Gurley K, Kareem A. Application of wavelet transforms in earthquake, wind and ocean engineering[J]. Engineering Structures, 1999,21(3):149-167.
- [8] 郭学彬,肖正学,张志呈,等.爆破振动作用的坡面效应[J].岩石力学与工程学报,2001,20(1):81-87.
GUO Xue-bin, XIAO Zheng-xue, ZHANG Zhi-cheng, et al. Slope effect of blasting vibration[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001,20(1):81-87.

Vibration analysis of an explosion vessel based on wavelet packet transform^{*}

GUAN Yong-hong, HU Ba-yi, HUANG Chao

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: The wavelet packet transform, in which the wavelet DB8 was chosen as the basis function, was applied to analyze the vibration signals of a 25-kg-TNT-equivalent explosion vessel. And the principle and characteristics of wavelet packet analysis were introduced and the experimental vibration acceleration signals of the explosion vessel were presented. The time-frequency distributions of the experimental signals were calculated by the wavelet packet method. The results show that the energy distribution of vibration of the explosion vessel has a very wide frequency range and fluctuates intensely, and the quakeproof trench attenuates approximately 97% of the vibration energy.

Key words: mechanics of explosion; time-frequency analysis; wavelet packet transform; explosion vessel

* Received 30 June 2009; Revised 22 February 2010

Corresponding author: GUAN Yong-hong, ifp_gyh@163.com